

**Zur allgemeinen Definition
des Wirkungsgrades**

Von Dr. P. Graßmann

1950

Rehabilitation - Latin

73-2-50



Zur allgemeinen Definition des Wirkungsgrades

Eingereicht als Habilitationsschrift

bei der

Naturwissenschaftlichen Fakultät

der

Johann Wolfgang Goethe-Universität in Frankfurt a. M.

von

Dr. P. Graßmann

Frankfurt a. M., Röderbergweg 251

1950

Die vorliegende Schrift entspricht der gekürzten Fassung, die auch in der Zeitschrift
Chemie-Ingenieur-Technik Bd. 22, S. 77/80 (1950) erschienen ist.

Einleitung

Es ist schon viel über die zweckmäßigste Definition eines Wirkungsgrades für einzelne Verfahren oder Vorrichtungen diskutiert worden, so z. B. über den Wirkungsgrad einer Kältemaschine¹⁾, eines Wärmeaustauschers²⁻⁵⁾. Es ergibt sich also die Frage, ob für diesen beim Vergleich verschiedener Verfahren so grundlegend wichtigen Begriff nicht eine allgemeine Definition möglich ist, in der die Wirkungsgraddefinitionen jeder der in Frage kommenden Vorrichtungen als Spezialfälle enthalten sind. Ganz allgemein muß der Wirkungsgrad wohl definiert werden als das Verhältnis der erzielten gewollten Wirkung zum Einsatz. Jedoch läßt sich dieser Definition erst dann ein mathematischer Sinn beilegen, wenn für Einsatz und Wirkung passende Maßstäbe gegeben sind. Es erscheint sinnvoll, den Begriff Wirkungsgrad auf solche Größen zu beschränken, bei denen Einsatz und Wirkung als Energiemengen oder als Energiemengen pro Zeiteinheit, d. h. als Leistungen, gemessen werden können.

Keine Schwierigkeiten der Definition treten in all den Fällen auf, in denen es sich bei Aufwand und Wirkung um Energieformen handelt, die wenigstens im Prinzip restlos in mechanische Arbeit umgewandelt werden können, also z. B. potentielle und kinetische Energie, elektrische Energie usw. Tatsächlich ist auch noch kein Streit darüber entstanden, was als Wirkungsgrad eines Getriebes, eines Elektromotors, einer Wasserturbine bezeichnet werden soll. Bei thermischen Vorgängen wird im allgemeinen als Wirkungsgrad das Verhältnis der tatsächlich übertragenen oder umgesetzten zur aufgewandten Wärmemenge bezeichnet. Diese Definition ist nur solange richtig, als es, wie bei reinen Heizvorgängen, nur auf die Wärmemenge ankommt, nicht aber auf ihre Qualität, d. h. die Temperatur, bei der sie zur Verfügung steht, also auf ihren Arbeitswert. Daß dieser Vergleich der Wärmemengen nicht allgemein anwendbar ist, wird sofort klar, wenn wir die Probleme nicht als Wärmetechniker, sondern als Kältetechniker betrachten. Denn für ihn ist ja gerade der Entzug von Wärme das Ziel.

Die „Arbeitsfähigkeit“

Auf Grund der folgenden thermodynamischen Überlegung läßt sich der für unsere Betrachtungen allein mögliche Begriff eindeutig festlegen. Wir denken uns dazu denjenigen Teil-

prozeß, dessen Wirkungsgrad bestimmt werden soll, von einer Bilanzhülle umgeben, wobei vorausgesetzt sei, daß die Vorgänge in ihrem Innern als stationär betrachtet werden können.

Diesem Bilanzgebiet wird Energie in folgenden Formen zugeführt:

1. als innere Energie U_s der zuströmenden Gase s , wozu noch die entsprechenden Einschubarbeiten $p_s v_s$ hinzugefügt seien (p_s = Druck, v_s = Volumen des strömenden Gases), so daß sich die Summe der Enthalpien (= Wärmehalte) $\sum J_s$ ergibt ($J_s = U_s + p_s v_s$). Treten auch noch chemische Änderungen auf, so ist die bei diesen maximal zu gewinnende Arbeit noch hinzuzufügen,
2. als Wärmeströme Q_i , die, z.B. durch Wärmeleitung oder Strahlung, in das Bilanzgebiet eintreten, ohne von materiellen Teilen getragen zu sein,
3. als Arbeitsbeträge A_r .

Werden alle zufließenden Energieströme mit dem positiven, alle abströmenden mit dem negativen Vorzeichen versehen, so erscheint der erste Hauptsatz in der Form:

$$\sum_s J_s + \sum_i Q_i + \sum_r A_r = 0 \quad (1).$$

Würden alle Vorgänge im Bilanzgebiet reversibel verlaufen, so wäre die Entropieänderung gleich null, so daß gelten würde:

$$\sum_s S_s + \sum_i Q_i / T_i = 0 \quad (2).$$

Dabei ist T_i die Temperatur, bei der die Wärmemenge Q_i die Bilanzhülle durchdringt. Durch Multiplikation dieser Gleichung mit der Umgebungstemperatur T_u und Subtraktion von Gl. (1) erhält man:

$$\sum_s (J_s - T_u S_s) + \sum_i Q_i \frac{T_i - T_u}{T_i} + (\sum_r A_r)_{\min} = 0 \quad (3).$$

Dabei ist $(\sum_r A_r)_{\min}$ der unter Berücksichtigung des Vorzeichens kleinste Wert der aufzunehmenden Arbeit bzw. Leistung. Ist $\sum A_r$ negativ, wird also Arbeit geleistet, so stellt es den Maximalwert dieser abgegebenen Leistung dar. In den Gleichungen (1), (2) und (3) können die Summen natürlich auch durch Integrale ersetzt werden.

In den Gliedern der zweiten Summe erkennt man unmittelbar den theoretisch in mechanische Arbeit umsetzbaren Betrag der Wärmemenge Q_i , wenn ein Wärmebehälter mit der Temperatur T_u gegeben ist, denn nehmen wir an, daß keine Gas-

ströme in das Bilanzgebiet ein- oder austreten, also die erste Summe gleich null ist, so reduziert sich Gl. (3) auf die bekannte Gleichung für den Carnotschen Kreisprozeß. Nehmen wir dagegen an, daß keine Wärme durch Leitung zugeführt wird, also die zweite Summe gleich null ist, so folgt für die insgesamt maximal zu leistende Arbeit $A'_{\max}$

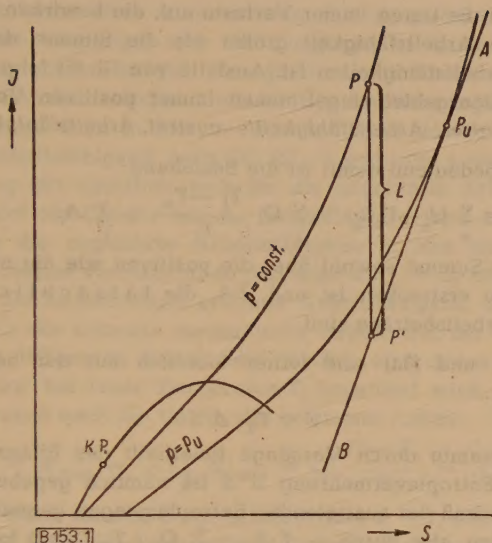
$$A'_{\max} = -(\sum_r A_r)_{\min} = \sum_s (J_s - T_u S_s) \quad (4).$$

Die Glieder $J_s - T_u S_s$ stellen also die Arbeitsfähigkeit der mit den Gasströmen s in das Bilanzgebiet eintretenden Energien dar. Dabei ist vorausgesetzt, daß nur bei der Umgebungs- (Kühlwasser)temperatur T_u beliebige Wärmemengen aufgenommen oder abgegeben werden können. Sie ist zu unterscheiden von dem Gibbsschen Potential, das durch $J_s - T_s S_s$ gegeben ist. Dagegen besteht eine enge Beziehung zu der besonders von Bošnjaković⁶⁾ benutzten „technischen Arbeitsfähigkeit“ die durch die Gleichung:

$$L_t = J_s - J_u - T_u(S_s - S_u) \quad (5)$$

definiert ist. Sie entspricht der Arbeit, die geleistet werden kann, wenn uns ein Stoff laufend im Zustand J_s, S_s geliefert wird und er in reversibler Weise auf den Umgebungszustand J_u, S_u gebracht wird, wobei nur bei der Umgebungstemperatur Wärme ausgetauscht werden darf. Definition (5) wird mit Definition (4) identisch, wenn wir annehmen, daß die Gase im Umgebungszustand J_u, S_u das Bilanzgebiet verlassen. Wenn dies auch im allgemeinen nicht zutreffen wird, weil häufig der Fall eintritt, daß die Gase auch nach dem Verlassen des Bilanzgebietes noch Arbeitsfähigkeit enthalten, die dann etwa in einem nachfolgenden Verfahrensschritt ausgenützt wird, so macht das praktisch wenig aus; denn in unseren Gleichungen treten immer die Differenzen der Arbeitsfähigkeiten beim Eintreten und Verlassen des Bilanzgebietes auf. Für diese ist es aber gleichgültig, ob Gl. (4) oder (5) zu Grunde gelegt wird.

Die durch Gl. (5) definierte technische Arbeitsfähigkeit kann leicht aus dem J, S -Diagramm (Mollier-Diagramm) als senkrechter Abstand zwischen dem Zustandspunkt und der „Umgebungsgeraden“ abgegriffen werden⁶⁾, Bild 1. Die Umgebungsgerade ist dabei definiert als die Tangente an die Isobare $p = p_u$ bei der Temperatur $T = T_u$. Daraus erkennt man z. B. unmittelbar, daß für $p > p_u$ immer $L_t > 0$ ist und für $p = p_u$ in der Nähe von $T = T_u$ mit $(T - T_u)^2$ ansteigt.



[B 153.1]

Bild 1. Darstellung der technischen Arbeitsfähigkeit im J, S -Diagramm.

P_u = Umgebungspunkt mit $p = p_u$ und $T = T_u$;

$A - P_u - B$ = Umgebungsgerade. P = Bildpunkt des betrachteten Zustands. P' senkrecht unter P .

Als „zugeführte Arbeitsfähigkeit“ L wollen wir aber nicht nur die Glieder $J_s - T_u S_s$, sondern auch die Glieder der 2. und 3. Summe in Gl. (4), soweit sie positiv sind, bezeichnen, denn auch die Wärmemenge Q_i , (für $T_i = T_u$) wie natürlich auch die mechanischen und elektrischen Energien A_r , stellen eine Zufuhr von Arbeitsfähigkeit zum Bilanzgebiet dar. Wir definieren also allgemein die dem Bilanzgebiet zugeführte Arbeitsfähigkeit L_z durch:

$$L_z = \sum_s [(J_s - J_u - T_u(S_s - S_u))] + \sum_i Q_i \frac{T_i - T_u}{T_i} + \sum_r A_r \quad (6),$$

wobei die Summe jedoch nur über die positiven Glieder zu erstrecken ist. Bei den bisher allein betrachteten verlustlosen Prozessen wäre nach Gl. (3) die Summe der positiven Glieder gleich der Summe der negativen Glieder, also:

$$\text{zugeführte Arbeitsfähigkeit} = \text{abgeführte Arbeitsfähigkeit} \quad (7).$$

Praktisch haben wir es jedoch niemals mit reversiblen Prozes-

sen zu tun. Es treten immer Verluste auf, die bewirken, daß die zugeführte Arbeitsfähigkeit größer als die Summe der abgeführten Arbeitsfähigkeiten ist. Anstelle von Gl. (6) folgt also für den im Bilanzgebiet eingetretenen immer positiven Verlust V :
 $V = \text{eintret. Arbeitsfähigkeit} - \text{austret. Arbeitsfähigkeit} \quad (8).$

Gleichbedeutend damit ist die Beziehung:

$$V = \sum_s (J_s - T_u S_s) + \sum_i Q_i \frac{T_i - T_u}{T_i} + \sum_r A_r \quad (8a),$$

wobei die Summe sowohl über die positiven wie die negativen Glieder zu erstrecken ist und $\sum A_r$ die tatsächlich zugeführten Arbeitsbeträge sind.

Gl. (8) und (8a) sind ferner identisch mit der bekannten Gleichung:

$$V = T_u \cdot \Delta S \quad (9).$$

Die gesamte durch Vorgänge innerhalb des Bilanzgebietes bedingte Entropievermehrung ΔS ist nämlich gegeben durch den Überschuß der austretenden Entropiemengen gegenüber den eintretenden, also durch $-\sum S_s - \sum Q_i / T_i$. Damit folgt dann aus Gl. (8a) unter Berücksichtigung von Gl. (1) wieder Gl. (9).

Zur Definition des Wirkungsgrades

In jedem Teil einer größeren Apparatur, d. h. bei jedem einzelnen Verfahrensschritt, wird unter Einsatz einer gewissen Arbeitsfähigkeit andere Arbeitsfähigkeit erzeugt oder vermehrt. Bezeichnen wir die aufgewendete Arbeitsfähigkeit, die der Abnahme der Arbeitsfähigkeit des eingesetzten Stoffes entspricht, mit ΔL_- , die beabsichtigte Vermehrung der Arbeitsfähigkeit des anderen Stoffes mit ΔL_+ , so gelangen wir zu der folgenden allgemeinen Definition für den Wirkungsgrad η :

$$\eta = \frac{\Delta L_+}{\Delta L_-} \quad (10).$$

Solange die gewollte Wirkung überhaupt erzielt wird, d. h. solange $\Delta L_+ > 0$, ist also auch $\eta > 0$. Andererseits würde $\eta > 1$ aber zu einem Widerspruch mit den Hauptsätzen der Thermodynamik führen, denn $\Delta L_+ > \Delta L_-$ würde die Konstruktion eines Perpetuum mobile erster oder zweiter Art ermöglichen. Also ist für jeden sinnvollen Prozeß:

$$0 < \eta < 1 \quad (11).$$

Es ist ferner ohne weiteres klar, daß für mechanische oder elektrische Vorgänge, oder für Vorgänge, in denen eine Umwandlung dieser beiden Energieformen ineinander eintritt, Gl. (10) mit den üblichen Definitionen des Wirkungsgrades im Einklang ist, denn in diesem Falle reduziert sich ja die zugeführte Arbeitsfähigkeit nach Gl. (6) — und eine entsprechende Gleichung gilt natürlich auch für die abgeführte Arbeitsfähigkeit — auf die Glieder mit A_r . Beispielsweise wird beim Elektromotor die zugeführte Arbeitsfähigkeit L_z des elektrischen Stromes restlos verbraucht, so daß also $\Delta L_- \doteq L_z$ ist, andererseits ist die beabsichtigte erzeugte Arbeitsfähigkeit ΔL_+ gegeben durch die erzeugte mechanische Arbeit. Bei der Umwandlung von Wärme in Arbeit folgt für den einfachsten Fall, daß Wärme nur bei einer Temperatur T_i zugeführt wird, im reversiblen Prozeß nach Gl. (3) für die geleistete Arbeit:

$$\Delta L_+ = A'_{\max} = - \left(\sum_r A_r \right)_{\min} = Q_i \frac{T_i - T_u}{T_u} = \Delta L_- \quad (12).$$

Es ist somit für den Carnotschen Prozeß $\eta = 1$, d. h. der Wirkungsgrad wird allgemein auf den Carnotprozeß als Vergleichsprozess bezogen, der auch die sinnvollste Vergleichsbasis darstellen dürfte⁷⁾. Entsprechendes gilt für den Kälteprozeß, wobei η nach Gl. (10) mit der von R. Plank¹⁾ vorgeschlagenen Definition des Wirkungsgrades zusammenfällt.

Gl. (10) ist jedoch viel allgemeiner anwendbar, denn sie kann ohne weiteres benutzt werden, wenn Wärmeströme $(\sum_i)$ bei ganz verschiedenen Temperaturen, außerdem noch Gase oder Flüssigkeiten $(\sum_{i,s})$ oder mechanische Arbeiten [z. B. Speisepumpe $(\sum_r A_r)$], zugeführt werden. Natürlich kann es in manchen Fällen auch zweckmäßig sein, die Summen durch Integrale zu ersetzen.

Das Flußbild der Arbeitsfähigkeit

Gl. (8) gibt die Möglichkeit, den Fluß der durch Gl. (6) definierten Arbeitsfähigkeit, — ähnlich wie das Sankey für den Wärme fluß getan hat, — durch ein Flußbild darzustellen, in dem unmittelbar die Stellen zu erkennen sind, an denen die Verlustbekämpfung vornehmlich einzusetzen hat. Als Beispiel ist in Bild 2 und 3 neben der Schemazeichnung, Bild 2, auch das Flußbild der Arbeitsfähigkeit eines kleinen Luftverflüssigers darge-

stellt, Bild 3. Die Kälte wird hier in einfacher, aber thermodynamisch unbefriedigender Weise durch den *Joule-Thomson*-Effekt erzeugt. Dazu wird in dem vorliegenden Fall die Luft zunächst auf 200 atü verdichtet, dann durch Wasser und anschließend durch den nicht verflüssigten Anteil der Luft gekühlt, um schließlich in einem Ventil entspannt zu werden, wobei sie sich zum Teil verflüssigt. Im Flußbild der Arbeitsfähigkeit sind die Verluste im Wärmeaustauscher noch aufgeteilt in die durch Druckabfall bedingten „ ΔP -Verluste“, die durch die endlichen Temperaturdifferenzen zwischen den beiden Gasen bedingten „ Δt -Verluste“ und die durch Wärmeaustausch mit der Umgebung bedingten „ ΔQ -Verluste“. Es erübrigt sich, näher auf das hier gezeichnete Flußbild einzugehen, es soll nur ein Beispiel dafür sein, daß durch derartige Bilder die energetischen Umsetzungen zusammengesetzter Apparate sehr anschaulich dargestellt werden können.

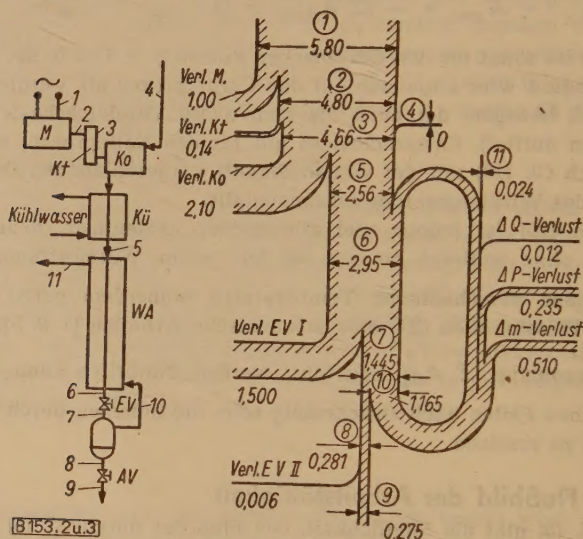


Bild 2 u. 3. Schema und Flußbild einer kleinen Luftverflüssigungsanlage. M Elektromotor; Kt Keilriementrieb; Ko Kompressor; Kü Kühler; WA Wärmeaustauscher; EV Entspannungsventil; AV Abzapfventil; $T_u = 300^\circ \text{ abs} = + 26,8^\circ \text{ C}$. Für die Mengen N (Nm^3/h), Druck p (ata) und Temperaturen t ($^\circ \text{C}$) sind folgende Werte vorausgesetzt:

Punkt	N	p	t
5	16,03	200	+ 26,8
6	16,03	200	— 100
7	16,03	2,0	— 186
8	1,13	2,0	— 186
9	1,05	1,0	— 193
10	14,9	2,0	— 186
11	14,9	1,0	+ 24,8

Bei größeren Anlagen ergeben sich natürlich wesentlich günstigere Werte für die Wirkungsgrade. Die Zahlenangaben im Flußbild 3 (rechts) geben die Arbeitsfähigkeit in kW an den in Bild 2 (links) gekennzeichneten Punkten (1), (2) usw. an

Der thermodynamische Wirkungsgrad von Wärmeaustauschern

Jeder an einer thermodynamisch sinnvollen Stelle eingesetzte Wärmeaustauscher dient dazu, die Arbeitsfähigkeit eines Stoffes entweder bei $T > T_u$ durch Erwärmung oder bei $T < T_u$ durch Abkühlung zu erhöhen. Die gewollte Wirkung ΔL_+ ist also die Zunahme der Arbeitsfähigkeit desjenigen Stoffes, der für einen der folgenden Verfahrensschritte bei hohen oder tiefen Temperaturen gebraucht wird. Der Einsatz ist die Abnahme ΔL_- der Arbeitsfähigkeit desjenigen Stoffes, der entweder bei $T > T_u$ Wärme abgibt, oder bei $T < T_u$ Wärme aufnimmt. Gl. (10) deckt sich dann also mit der schon früher vom Verfasser²⁾ für den Wirkungsgrad von Wärmeaustauschern angegebenen Gleichung:

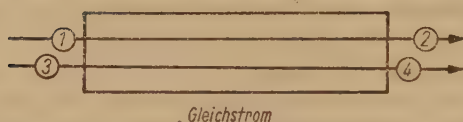
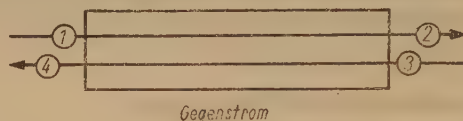
$$\eta = \frac{\Delta L_+}{\Delta L_-} = \frac{L_2 - L_1}{L_3 - L_4} \quad (\text{Vergl. Bild 4 u. 5}) \quad (13).$$

Hierzu sei folgendes bemerkt:

1. Wärmeaustauscher werden gelegentlich auch dazu verwandt, um einen zunächst heiß anfallenden Stoff zum Zwecke seiner weiteren Bearbeitung zu kühlen, wie das z. B. in den Zwischenkühlern von Kompressoren der Fall ist. Hierbei wird also absichtlich Arbeitsfähigkeit vernichtet, und es ist klar, daß auf diese Fälle Gl. (12) nicht anwendbar ist, es sei denn, daß man die Anwärmung des Kühlwassers als Nutzarbeit ansieht.
2. Aus diesem Beispiel des Wärmeaustauschers wird klar, daß in Gl. (10) in den Nenner nicht einfach die zu geführte, in den Zähler die ab geführte Arbeitsfähigkeit eingesetzt werden darf. Man muß sich vielmehr in jedem einzelnen Fall fragen,

welche Arbeitsfähigkeit gesteigert werden und auf Kosten welcher Arbeitsfähigkeit dies geschehen soll.

3. $\eta = 1$ wird nur erreicht, wenn auf beiden Seiten des Wärmeaustauschers kein Druckabfall eintritt, keine Wärme mit der Umgebung ausgetauscht wird und die Temperaturdifferenz zwischen beiden Stoffen im Austauscher überall gleich null ist. Letzteres ist nur möglich, wenn die Wärmekapazität beider Stoffe gleich ist, was häufig nur durch Anordnung entsprechender Hilfskreisläufe erreicht werden kann.



[8153.4 u. 5]

Bild 4 und 5. Schema des Wärmeaustauschers.

Zur Erläuterung der Bezeichnungen in Gl. (13).

Es ist angenommen, daß die Arbeitsfähigkeit des oben strömenden Stoffes (1→2) auf Kosten des unten strömenden Stoffes (3→4) erhöht werden soll.

Es sei ferner noch kurz auf das Verhältnis von Gl. (13) zu einigen von anderer Seite vorgeschlagenen Bewertungsmaßstäben eingegangen. Nach Schack⁸⁾ wird der Wirkungsgrad eines Austauschers definiert als das Verhältnis der wirklich übertragenen Wärme zu der höchstens übertragbaren Wärme. Diese Definition ist brauchbar, wenn es, wie bei Heizungs Vorgängen, nur auf die Wärmemenge und nicht auf die Qualität der Wärme, d. h. auf die Temperatur, ankommt. Diese Größe kann als „thermischer Wirkungsgrad“ bezeichnet werden. Von H. Glaser⁴⁾ wird ein Ausdruck für den Wirkungsgrad von Austauschern — dort als „Gütegrad“ bezeichnet — angegeben. Er geht zwar auch von der Arbeitsfähigkeit aus, berücksichtigt aber nur die durch den Druckabfall und die endliche Temperaturdifferenz an dem Austauscherende mit dem kleineren Temperaturunterschied bedingten Verluste. (Vergl. seine Gl. (27)).

Es ist ferner eine Reihe von Bewertungsmaßstäben angegeben

worden^{2,3,9-11}), durch die der Druckabfall im Austauscher mit der Wärmeübergangszahl in Beziehung gesetzt wird. Diese bilden zwar ein wichtiges Hilfsmittel für den Konstrukteur, um zu beurteilen, wie weitgehend der Druckabfall zur Verbesserung des Wärmeübergangs ausgenützt oder nur an Stellen verbraucht wird, wo er für den Wärmeübergang zwecklos ist. Sie können aber nicht mit dem oben angeführten Wirkungsgrad verglichen werden. Wenn auch die vom Verfasser⁹) vorgeschlagene Gütezahleine unbenannte Zahl ist, so haben doch die Zähler und Nenner nicht die Dimension einer Energie oder Leistung. Sie könnte nur als Wirkungsgrad bezeichnet werden, wenn dieser Begriff sprachlich unzulässig erweitert würde. Auch besteht hier durchaus die Möglichkeit, daß sich Werte über 1 ergeben.

Sodann ist es aber sehr wohl möglich, daß ein Austauscher mit hoher Gütezahl, an einer thermodynamisch ungünstigen Stelle eingebaut, einen sehr schlechten thermodynamischen Wirkungsgrad ergibt. Würden wir beispielsweise einen der hochgezüchteten Austauscher, wie sie bei der Luft- und Gaszerlegung verwandt werden, dazu benützen, um etwa Luft von $+20^{\circ}$ auf $+50^{\circ}$ zu erwärmen und dabei Temperaturdifferenzen von 2 oder 3° vorschreiben, die in der Technik der tiefsten Temperaturen üblich und auch durchaus sinnvoll sind, so ergäbe sich wahrscheinlich ein negativer thermodynamischer Wirkungsgrad, denn an Ventilationsarbeit wäre mehr aufzubringen, als durch die Wärmeübertragung gewonnen werden könnte.

Umgekehrt kann aber auch ein schlecht konstruierter Austauscher, bei dem beispielsweise trotz eines nur mäßigen Wärmeübergangs ein großer Druckverlust auftritt, einen hohen thermodynamischen Wirkungsgrad ergeben, wenn er nur an passender Stelle eingebaut ist und ein hoher Druckverlust dadurch vermieden wird, daß der Austauscher sehr groß gewählt wird.

Die Gütezahl zeigt also dem Konstrukteur des Austauschers, welches Konstruktionsprinzip, z. B. Längs- oder Querstrom, fluchtende oder versetzte Rohranordnung, bei vorgegebenem Druckverlust die kleinsten Flächen oder überhaupt den niedrigsten Baustoffaufwand ergibt. Dagegen ist der thermodynamische Wirkungsgrad maßgebend für das Verhalten innerhalb einer vorgegebenen Gesamtapparatur.

Wie auch bei Motor oder Getriebe der Wirkungsgrad angegeben werden kann, wenn wir nur die ein- und austretenden

Arbeitsfähigkeiten kennen, so kann auch beim Wärmeaustauscher diese Aufgabe gelöst werden, ohne daß wir über seine Konstruktion selbst irgendwelche Angaben besitzen. Dagegen erfordert die Errechnung der Gütezahl immer noch die Kenntnis weiterer Bestimmungsstücke, z. B. hier der Austauschfläche.

Am Rande sei dazu noch bemerkt, daß auch die von Kühne⁹⁾ und Glaser¹⁰⁾ vorgeschlagenen Bewertungsmaßstäbe durch die vom Verfasser benutzte Gütezahl dargestellt werden können. All dies sind nur verschiedene Rechenmethoden, die aber zu dem gleichen Endergebnis führen.

So ist z. B. die von Glaser¹⁰⁾ definierte Leistungszahl ε_1 (dortige Gl. 3 u. 16) dem vom Verfasser⁹⁾ benutzten Ausdruck (dortige Gl. 12) $Q/(V \cdot \Delta p \cdot \Delta_m)$ proportional. Für ein bestimmtes vorgegebenes System, also für vorgegebene Werte von Δ_m , δ , G , c_1 ergibt sich also für die Übertragungsfläche in Abhängigkeit von ε_1 bzw. $Q/(V \cdot \Delta p \cdot \Delta_m)$ im doppellogarithmischen Schaubild eine Gerade. Für verschiedene Systeme ergeben sich, solange ihre G -Werte konstant sind, parallel nach oben oder unten verschobene Geraden, wobei der Betrag der Verschiebung gegenüber dem leeren Rohr gegeben ist durch $-1,41 \lg G$. Dies ist aber gerade das, was auch Bild 6 der Arbeit von Glaser zeigt.

Statt Wärmeübergang und Druckverlust miteinander in Beziehung zu setzen, können natürlich auch andere Kombinationen wesentlicher Größen, z. B. übertragene Wärmemenge und Gewicht oder Raumerfüllung oder Preis für die Bewertung herangezogen werden. Dabei handelt es sich aber immer um Maßstäbe, die mit dem themodynamischen Verhalten des Austauschers nicht unmittelbar zu tun haben.

Der Wirkungsgrad der Kälteerzeugung

Zur weiteren Klarlegung der hier vorgeschlagenen allgemeinen Definition des Wirkungsgrades thermodynamischer Verfahren sei noch die Kälteerzeugung betrachtet. Wird Kälte durch Entspannung eines komprimierten Gases unter äußerer Arbeitsleistung erzeugt, so wird die mit dem komprimierten Gas in die Entspannungsvorrichtung eintretende Arbeitsfähigkeit, soweit sie nicht zur Deckung der Verluste verbraucht wird, teils als äußere Arbeitsleistung, teils als Arbeitsfähigkeit, die dem austretenden Gas auf Grund seiner tiefen Temperatur innewohnt, abgegeben. So ist beispielsweise in Bild 6 und 7 angenommen, daß auf -150° vorgekühlte Luft in einer Entspannungsvorrichtung mit einem inneren Wirkungsgrad von 50% von 10 auf 1 ata entspannt wird. Der innere Wirkungsgrad der Entspannung

ist dabei wie üblich definiert durch die tatsächliche Enthalpieabnahme dividiert durch die Enthalpieabnahme bei verlustloser (= isentropischer) Entspannung. Aus der entspannten Luft wird nun soviel Nutzkälte entnommen, daß der Rest noch ausreicht, um im Wärmeaustauscher die komprimierte Luft auf die Ausgangstemperatur der Entspannung von -150° abzukühlen. Bei Benutzung dieser einfachen Schaltung treten außer bei der Entspannung selbst wegen der verschiedenen Wärmekapazität der ein- und ausströmenden Gase notwendigerweise auch im Wärmeaustauscher Verluste auf. Der Gesamtwirkungsgrad die-

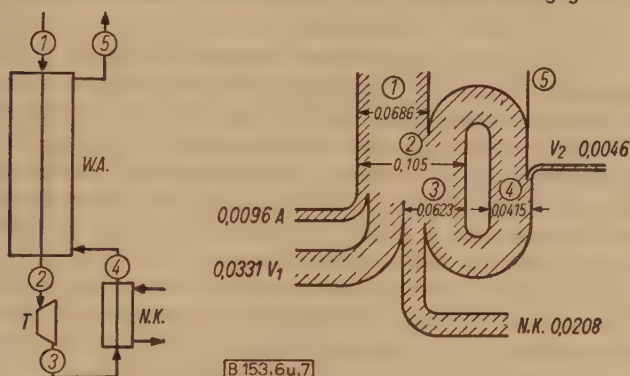


Bild 6 und 7. Kälteerzeugung durch die Entspannung von Luft mit äußerer Arbeitsleistung.

Bild 6 (links) Schema, Bild 7 (rechts) Flußbild der Arbeitsfähigkeit mit Zahlenangaben in kWh/Nm³; WA = Wärmeaustauscher; T = Turbine bzw. Expansionsmaschine; NK = Nutzkälte; A = von der Turbine abgegebene mechanische Arbeitsleistung, V_1 = Verlust in Turbine, V_2 = Verlust in WA.

Vorausgesetzt sind folgende Werte:

Punkt	p (ata)	t ($^\circ\text{C}$)
1	10	+ 26,8
2	10	— 150
3	1	— 187
4	1	— 159
5	1	+ 26,8

Es ist also der praktisch nicht ganz zu verwirklichende Fall angenommen, daß die Temperaturdifferenz am warmen Ende des Austauschers null ist.

ser Anordnung, wenn sie zur Kälteerzeugung betrieben wird, ist also nach obigem gegeben durch die Gleichung:

$$\eta = \frac{L_3 - L_4}{L_1 - L_5} \quad (14);$$

denn die Abnahme der Arbeitsfähigkeit $L_3 - L_4$ beim Durchgang durch den Kühler K entspricht unter der Annahme, daß dieser Kühler verlustlos arbeitet, ja gerade der Arbeitsfähigkeit der erzeugten Kälte.

Sollte aber dieselbe Anordnung für die Erzeugung von mechanischer Arbeit dienen, so wäre der Wirkungsgrad zu definieren durch die Beziehung:

$$\eta = \frac{A}{L_1 - L_5} \quad (15).$$

Es ergeben sich also ganz verschiedene Ausdrücke, je nach der Energieform, die wir tatsächlich gewinnen wollen. Dies kann mit der Tatsache verglichen werden, daß sich auch für die Ausbeute irgend eines Prozesses bei dem mehrere wertvolle Stoffe gleichzeitig gewonnen werden, ganz verschiedene Werte ergeben, je nach dem Stoff, den wir als das Hauptprodukt des Prozesses ansehen. Es ist klar, daß diese Wirkungsgraddefinition auch auf beliebige andere Kälteprozesse, z. B. Absorptions- und Adsorptionsmaschinen angewandt werden kann, denn auch für die in diesen Maschinen eintretenden Mischungs- und Entmischungsvorgänge sind die Entropieänderungen im Prinzip gegeben, wenn auch natürlich noch nicht für alle Stoffpaare die entsprechenden Messungen vorliegen. So läßt sich auch hier nicht nur für den Gesamtprozeß, sondern sogar für einen beliebig herausgegriffenen Teilprozeß der Wirkungsgrad angeben. Gerade in dieser allgemeinen Anwendbarkeit erblicken wir den Vorteil der vorliegenden Betrachtungen. Eingeg. 25. Nov. 1949 [B 153]

Schrifttum

- ¹⁾ R. Plank, Z. ges. Kälteind. 44, 147/51 [1937].
- ²⁾ P. Graßmann, Ann. d. Phys. V. 42, 203/10 [1942].
- ³⁾ H. Kühne, Z. Ver. dtsh. Ing., Beihefte Verfahrenstechnik [1944] 47/53.
- ⁴⁾ H. Glaser, diese Ztschr. 21, 95/99 [1949].
- ⁵⁾ Th. Schmidt, Kältetechnik 1, 81/86 [1949].
- ⁶⁾ Fr. Bosnjakovic, Technische Thermodynamik, Dresden 1935 Bd. 1 S. 138.
- ⁷⁾ Vergl. z. B. W. Wien u. F. Harms: Hdb. d. Experimentalphysik, Leipzig 1929, Bd. 9/2 S. 26.
- ⁸⁾ A. Schack, Der industrielle Wärmeübergang, Düsseldorf 1948.
- ⁹⁾ P. Grassmann, diese Ztschr. 20, 289/92 [1948].
- ¹⁰⁾ H. Glaser, diese Ztschr. 20, 129/33 [1948].
- ¹¹⁾ Th. E. Schmidt, Kältetechnik 21, 95/99 [1948].

Lebenslauf

Am 13. 8. 1907 in München geboren, studierte ich an der dortigen Universität und in Berlin Experimentalphysik. Am 1. Juni 1932 promovierte ich bei Professor Dr. W. Gerlach mit einer Arbeit über den Ramaneffekt der Nitrate mit summa cum laude zum Dr. phil. Anschließend war ich von Herbst 1932 bis Frühjahr 1937 im Kältelaboratorium der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt in Berlin - Charlottenburg zunächst als Stipendiat der Notgemeinschaft, dann als wissenschaftlicher Angestellter tätig. Ich bearbeitete zuerst unter Prof. W. Meißner, anschließend zusammen mit Reg.-Rat Dr. Steiner Fragen der Supraleitung, in dessen Vertretung ich auch längere Zeit das Kältelaboratorium leitete. Im Frühjahr 1937 nahm ich meine jetzige Stellung in der Firma Messer an. Seit Frühjahr 1938 sind die meisten großen Neukonstruktionen dieser Firma auf dem Gebiet der Gasverflüssigung und Gaszerlegung durch mich berechnet und in ihren Grundlagen angegeben worden. Ich leite das physikalische Betriebslaboratorium dieser Firma und bin beratend für sämtliche Fabrikationszweige tätig. Trotz starker Inanspruchnahme durch die Tätigkeit in der Industrie war ich immer bestrebt, die Verbindung zur Hochschule aufrecht zu erhalten und mich auch rein wissenschaftlicher Tätigkeit zu widmen. (Vgl. die nachfolgend abgedruckte Liste meiner Veröffentlichungen.) Im Verein Deutscher Ingenieure bin ich z. Z. mit der Leitung des Vortragswesens des Frankfurter Bezirksvereins betraut.

Veröffentlichungen

Münchener Zeit.

(Ramaneffekt)

1. Ein einfacher Apparat zur Auswertung von Prismenspektrogrammen mit Hilfe der Hartmannschen Formel.
Physikalische Zeitschrift 32 S. 148—149, 1931.
2. Zur Methodik des Ramaneffektes.
Zeitschrift für Physik 72 S. 240—241, 1931.
3. Der Ramaneffekt wäßriger Nitratlösungen (Doktorarbeit).
Zeitschrift für Physik 77 S. 616—631, 1932.
4. Zum Ramaneffekt wäßriger Nitratlösungen.
Zeitschrift für Physik 82 S. 765—766, 1933.
5. Über die Breite der Ramanlinie des Benzols bei 992 cm^{-1} .
Zeitschrift für Physik 82 S. 767, 1933.
6. — u. Justus Weiler,
Das vollständige Ramanspektrum des Benzols von 4100 bis 5100 Å .
Zeitschrift für Physik 86 S. 321—337, 1933.

Berliner Zeit.

(Supraleitung)

7. Untersuchungen über die Mikrowiderstände der Supraleiter.
Physikalische Zeitschrift 37 S. 569—578, 1936.
Wissenschaftliche Abhandlungen der PTR 20 S. 165, 1936.
Berichte des VII. Intern. Kältekongresses 1936.
8. — u. H. Eicke,
Neue Erscheinungen bei der Induktion von Strömen in Supraleitern.
Physikalische Zeitschrift 38 S. 429—439, 1937.
9. W. Meißner, K. Steiner und P. Graßmann,
Über den Einfluß von Knickungen an Drähten auf den Eintritt der
Supraleitung.
Physikalische Zeitschrift 36 S. 519—520, 1935.
Wissenschaftliche Abhandlungen der PTR 19 S. 158—159, 1935.
10. K. Steiner u. P. Graßmann,
Der Einfluß der Kristallitgröße auf den Eintritt der Supraleitung.
Physikalische Zeitschrift 36 S. 516—519, 1935.
Wissenschaftliche Abhandlungen der PTR 19 S. 155—157, 1935.
11. Einige Eigenschaften von drehbaren supraleitenden Stromschleifen
im Magnetfeld.
Physikalische Zeitschrift 36 S. 256 u. S. 520—524, 1935.
Wissenschaftliche Abhandlungen der PTR 19 S. 160—164, 1935.
12. Stromverteilung auf parallelgeschaltete, glatte und geknickte
supraleitende Drähte.
Physikalische Zeitschrift 36 S. 542—545, 1935.
Wissenschaftliche Abhandlungen der PTR 19 S. 165—166, 1935.
13. Obere Grenze des Ohmschen Widerstandes von Supraleitern.
Physikalische Zeitschrift 36 S. 525—527, 1935.
Wissenschaftliche Abhandlungen der PTR 19 S. 167—168, 1935.
14. Eine obere Grenze der Thermokraft zwischen Supraleitern.
Physikalische Zeitschrift 36 S. 527—528, 1935.
Wissenschaftliche Abhandlungen der PTR 19 S. 168—170, 1935.
15. K. Steiner u. P. Graßmann,
Supraleitung.
Sammlung Vieweg, Tagesfragen aus den Gebieten der Naturwissen-
schaften und der Technik, Heft 112, Braunschweig 1937.

Frankfurter Zeit.

(Thermodynamik, Gasverflüssigung und -zerlegung.)

16. Neuere Verfahren zur Gewinnung flüssiger Luft und flüssigen
Sauerstoffs.
Zs. VDI 85 S. 526, 1941.
17. Zur Haltbarkeit von Schäumen.
Zs. VDI, Beihefte Verfahrenstechnik, Heft 1, S. 28, 1942.
18. Über den Wirkungsgrad von Wärmeaustauschern.
Annalen der Physik, 5. Folge 42, Heft 2 u. 3, S. 203—210, 1942.
19. Zur Berechnung der Ein- und Austrittstemperatur von Wärmeaus-
tauschern.
Zs. VDI, Beihefte Verfahrenstechnik, Heft 3, S. 87—90, 1943.

20. Vorteile der Unterkühlung für die Lagerung und Umfüllung von schwer verflüssigbaren Gasen.
Ol und Kohle 39 S. 648—649, 1943.
21. — u. Dr. R. Bechtle,
Das Schnittprofil beim Brennschneiden.
Zs. VDI 87 S. 603—604, 1943.
22. Kondensation und Verdampfung von Vielstoffgemischen.
Zs. VDI, Beihefte Verfahrenstechnik, Heft 3, S. 75—80, 1944.
23. Gg. Weiler u. P. Graßmann,
Neue Entwicklung auf dem Gebiet der Gaszerlegung.
Ol und Kohle 41 S. 12—16, 1945.
24. Bewertung von Wärmeübergang und Druckverlust in Wärmeaustauschapparaten.
Angewandte Chemie B 20 S. 289—292, 1948.
(Erscheint auch in der französ. Zeitschrift Chimie et Industrie.)
25. — u. Gg. Weiler,
Die neuere Entwicklung der Herstellung und Anwendung von Sauerstoff in den Vereinigten Staaten von Amerika.
Chemie-Ingenieur-Technik 21 S. 19—24, 1949.
26. Dauerstandfestigkeit von Weichlotnähren.
Zs. für Metallkunde 40 S. 156, 1949.
27. Die Erschließung der Energiequellen der Erde.
Brennstoff — Wärme — Kraft 1 S. 5—9, 1949.
28. Die Luft als industrieller Rohstoff. (Allgemein verständlicher Abriss der Luftzerlegung und Anwendung von Sauerstoff und Stickstoff.)
Energie und Technik, März 1950, S. 1—3.
29. Herstellung und Anwendung von Sauerstoff in den USA.
Zs. VDI 91 S. 638—639, 1949.
30. Zur Theorie des Brennschneidens.
Zs. f. angewandte Physik 1 S. 452—457, 1949.
31. Mitarbeit am Physikalischen Wörterbuch von Westphal.
(Sachgebiet: Physik der tiefsten Temperaturen. Kälterzeugung, Nernstscher Wärmesatz, He I u. II, kalorische Zustandsgleichung und viele andere Stichworte, z. Zt. im Druck.)
32. Mitarbeit an der Neuauflage des „Kohlrausch“.
(Sachgebiet: Tieftemperaturphysik, z. Zt. in Arbeit.)
33. Gegenstromkondensation bei gleichzeitigem Stoffaustausch bei Zweistoffgemischen.
Annalen der Physik (6) 7 S. 54—62, 1950.
34. Zur allgemeinen Definition des Wirkungsgrades.
Chemie-Ingenieur-Technik 22 S. 77—80, 1950.
35. Mitarbeit am Handbuch der Kältetechnik von R. Plank.
Z. Zt. in Arbeit.
36. Mitarbeit am Gmelinschen Handbuch der anorganischen Chemie.
(Fachgebiet Verflüssigung und Trennung von Luft.)
Z. Zt. in Arbeit.
37. Das supraflüssige Helium II.
Zs. VDI 92 S. 221—222, 1950.

